

(論文)

RR鍛造への数値シミュレーションの適用

RR Forging Finite Element Simulation



柿本英樹*
Hideki Kakimoto



長田 卓*
Takashi Choda



仲山公規***(工博)
Dr. Kiminori Nakayama



高橋洋一****(工博)
Dr. Youichi Takahashi



高原浩司****
Hiroshi Takahara



森 啓之****(工博)
Dr. Hiroyuki Mori

The 3D-FE method was applied to simulate RR forging. To estimate the deformation and load accurately, key analytical conditions were taken into consideration in the simulation. These included flow stress, temperature distribution across the diameter, and volume decrements caused by oxidation scaling and remeshing. Results showed that the shape of the arms and the load showed good agreement with actual measurements. Using these results, an optimum forging shape was then designed, and applied to the actual process.

まえがき = 船舶や発電機などに使われているディーゼル機関用クランク軸は、その製造方法によって、一体型クランク軸、組立型クランク軸に分類できる。中小型の高速ディーゼル機関には一体型クランク軸が用いられており、その製造方法としてRR鍛造法、TR鍛造法、多軸プレスによる方法などが開発されている¹⁾。

当社が採用しているRR鍛造方法は、精密な鍛造が可能であるが、プレス挙動や素材の変形挙動などが複雑で、鍛造工程設計を行うには豊富な経験や知識を必要としてきた。今後、これらの経験や知識を伝承し、より適正な工程設計手法を確立するためには、RR鍛造の変形挙動を定量的に把握し予測することが必要不可欠である。そのために、従来から解析技術の利用が試みられてきたが、RR鍛造における素材の金型への充填過程やバリの発生など複雑な挙動を予測するのは困難であった。

しかし、近年の解析手法の発達²⁾により3次元変形解析の実用化が進み、RR鍛造のような複雑な変形挙動の解析が可能になってきた。本研究では、RR鍛造工程設計手法を確立するため、3D-FEM変形解析を適用し、鍛造形状・荷重予測技術の開発を行った。

1. RR鍛造装置

1.1 RR鍛造の概要

RR鍛造工程では、図1のように自由鍛造により鍛錬された丸棒からRR鍛造用素材(RR素材)を機械加工する。その後、1気筒分に相当するピン軸、一对のブロック部、ジャーナル軸を部分加熱し、図2に示すように、プレスの圧下力をくさび機構により横方向の力に変換することで、RR素材に横圧縮力と偏芯力を同時に加えて1気筒を鍛造する。これを必要な気筒数回繰返して、1本のクランク軸に仕上げる。

図3にRR鍛造における変形挙動の詳細を示す。部分

加熱されたRR素材をRR鍛造装置に搬入し、金型内にセットする。このとき、ピン軸はポンチ、アンビルと呼ばれる金型で上下方向から固定され、ジャーナル軸は固定金型と呼ばれる金型で固定される(図3(1))。プレスが加圧し始めると、圧下力がくさび機構によって横圧縮

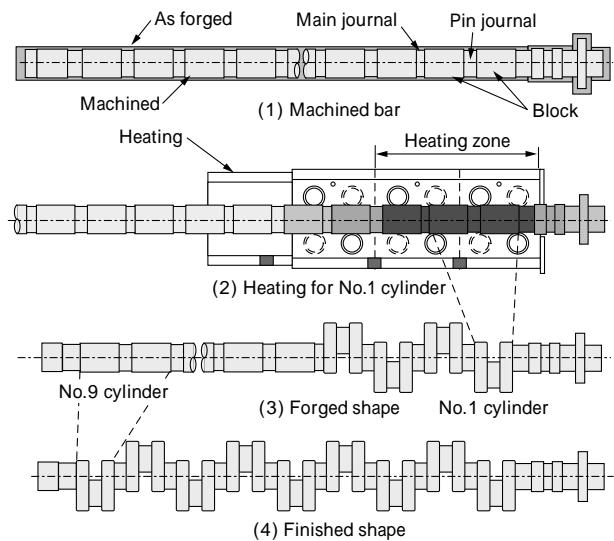


図1 自由鍛造丸棒から機械加工されたRR素材形状
Fig. 1 Shape of RR material formed from free forged bar

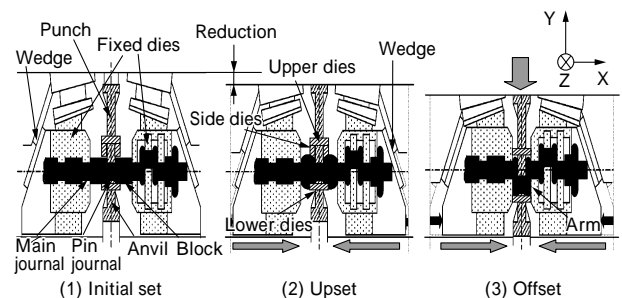


図2 RR鍛造の変形挙動
Fig. 2 Deformation behavior of RR forging

*技術開発本部 材料研究所 **協働コベルコ科研 エンジニアリングメカニクス事業部 ***鉄鋼部門 鋳鋼事業部 技術部 ****鉄鋼部門 鋳鋼事業部 製造部

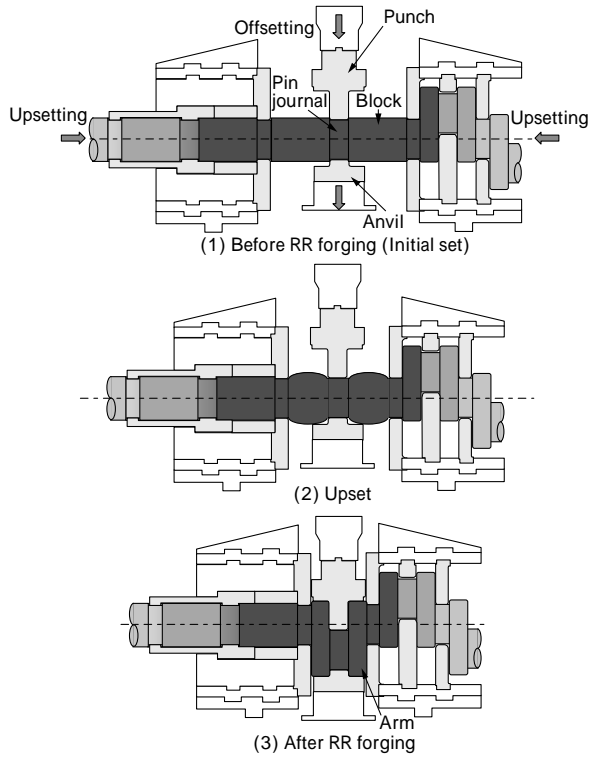


図3 RR鍛造の変形挙動
Fig. 3 Schematic illustration of RR forging

力に変換される。同時にポンチとアンビルは図示していないシリンダのリリーフ機構により、初期の位置でピン軸を保持したまま停止している。そのため、ブロック部のみ圧縮される工程となる(図3(2)アップセット)。アップセットが所定位置まで到達すると引き続きブロック部は圧縮され、ポンチとアンビルはプレス降下に伴い移動し、ピン軸が偏芯する工程(図3(3)オフセット)となり、所定のアーム形状が鍛造される。

1.2 RR鍛造における金型形状

RR鍛造において、アーム形状外周を金型で拘束しない場合は自由楕円のアーム形状が得られる³⁾。RR鍛造工程設計では、この自由楕円形状をベースに、要求されるクランク軸のアーム形状に合わせて金型で拘束することにより、適正な鍛造形状を設計している。このとき、アーム形状の大きさや金型の拘束強さにより鍛造荷重が大きく変化し、従来はその予測を経験に頼っていた。金型の拘束強さに応じた鍛造荷重の予測は、鍛造工程設計をする上で非常に重要である。金型の拘束は、表1に示すように大きく4種類に分類できる。表中の細線は自由楕円形状であり、太線が金型による拘束状態を表している。X,Zはそれぞれクランク軸長手方向(X方向)および側面(Z方向)からの投影した形状を示している。金型モードが からへ変化するに伴って、金型のRR素材への拘束強さが大きくなり、必要な鍛造荷重も大きくなる。金型モードは、アーム形状の上下面または左右面のどちらか一方のみの拘束で、金型モードでは上下面と左右面の両方を拘束した形状である。しかし、アーム形状の全周を拘束していないため、部分的に自由表面が残る半閉鎖鍛造(Semi closed type)である。金型モードではアーム形状の全体を拘束している。金型モード

表1 金型モードと金型形状
Table 1 Dies mode and dies shape

Dies mode	Semi closed		Closed	
View	X	Z	X	Z
Dies shape				
Note	Semi closed		Closed	

Back chamfer

は、金型モードの拘束に加えてバックチャンファを拘束した、最も拘束が大きいケースである。なお、バックチャンファ(表1灰色部)とは、ピン軸背面でジャーナル軸下に位置するアーム面取部である。金型モードおよびはともにアーム形状の全周に自由表面がなく、バリの発生を伴って金型内に完全充満する密閉鍛造(Closed type)である。

本研究では、3次元変形解析を用いて金型モードとで鍛造形状予測を行い、金型モードで鍛造荷重の予測を行った。

2.3 次元変形解析

2.1 解析モデル

変形解析に使用した代表的な金型モードの解析モデルを図4(解析モデル)に、目標鍛造形状を図5に示す。また、金型モードの解析モデルを図6(解析モデル)に、目標鍛造形状を図7に示す。解析モデルはその対称性を利用し、XY平面およびYZ平面を対称面とし

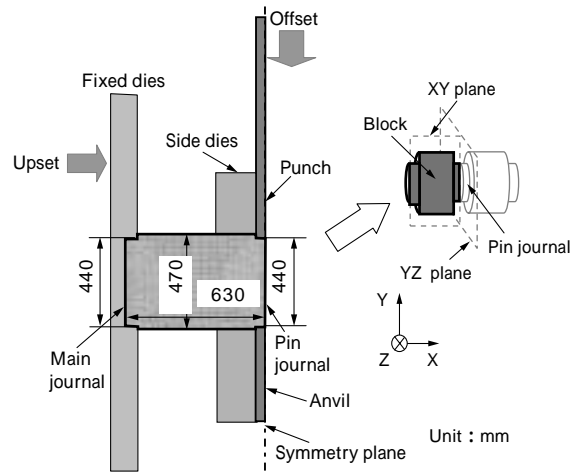


図4 変形解析モデル(金型モード)
Fig. 4 Deformation analysis model (Dies mode)

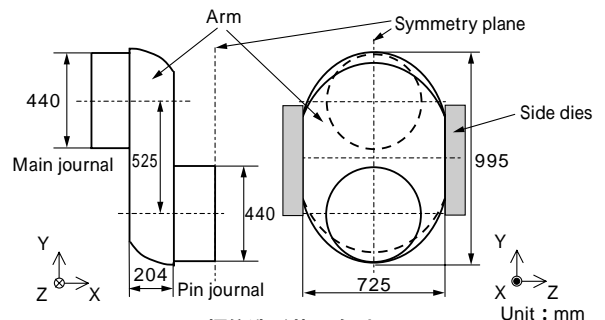


図5 目標鍛造形状(金型モード)
Fig. 5 Design of forged shape (Dies mode)

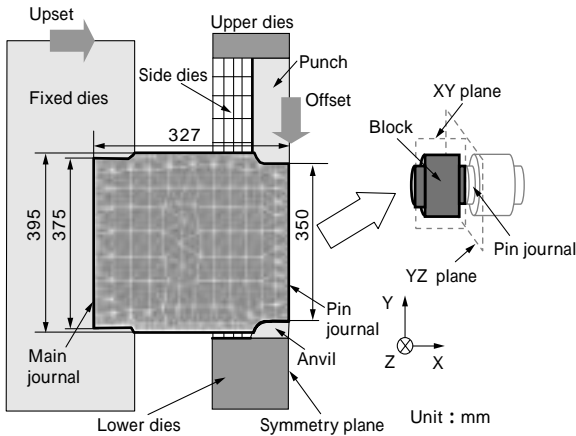


図6 変形解析モデル(金型モード)
Fig. 6 Deformation analysis model (Dies mode)

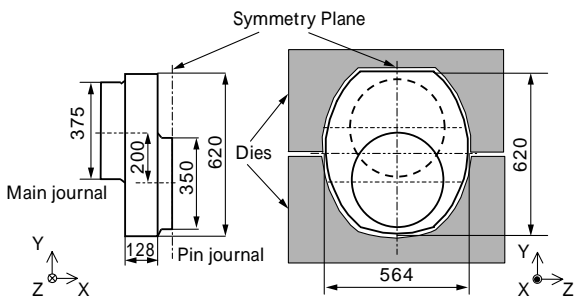


図7 目標鍛造形状(金型モード)
Fig. 7 Design of forged shape (Dies mode)

た1/4モデルである。なお、横圧縮方向は図中の+X方向であり、偏芯方向は、図中の-Y方向である。

2.2 解析条件

変形解析を行うにあたり、RR鍛造での各現象を定量把握し、解析モデルへ反映させる必要がある。本研究では、変形速度、変形抵抗値、素材温度分布、素材体積変化および摩擦条件について検討した。

2.2.1 変形速度

変形速度を実機の各工程に合わせるため、実機での測定を実施した。RR素材の横圧縮速度を代表する値として、固定金型のX方向移動速度を実測した。図8に金型モードでの実測データの一例を示す。ここで、横軸に時間、縦軸に固定金型の移動速度を示す。図9にこのときのRR素材の変形挙動概略図を示す。図8ののアップセットでは、図9(1)に示すようにブロックが単純圧縮変形のために平均移動速度(横圧縮速度)は10mm/secを越えていることがわかる。また、その後のオフセットについては、前半(図8)と後半(図8)に分けることができる。すなわち、前半では図9(2)のように偏芯・横圧縮のため金型との接触面積が増加するに伴い速度が徐々に低下してくるが、側面拘束金型にはまだ接触していない。一方、後半では、図9(3)のようにRR素材が側面拘束金型に接触し徐々に充満していくとともにアーム厚さが薄くなり鍛造荷重が増加するため速度が著しく低下し、最終的に横圧縮速度は1mm/sec程度となる。そこで、図8に示すように、変形速度としてアップセット(図8)の横圧縮速度は15mm/sec、オフセット前半(図8)の横圧縮速度は8mm/secとし、オフセット後半(図8)は1mm/secとした。また、偏芯

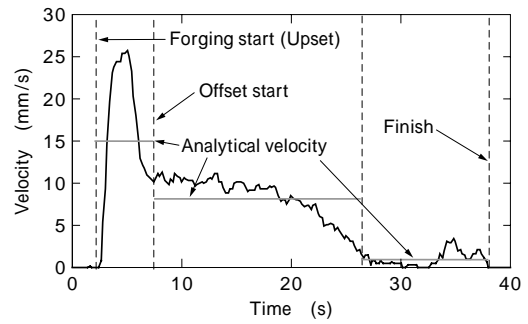


図8 固定金型の平均移動速度(X方向)
Fig. 8 Average velocity of fixed dies (X direction)

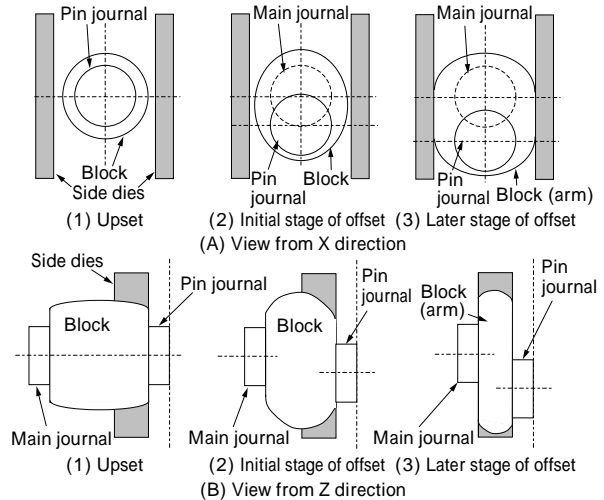


図9 金型接触の概略図
Fig. 9 Schematic illustration of contact with dies

表2 低合金鋼の化学成分
Table 2 Chemical composition of low alloy steel

	C	Si	Mn	Cr	Mo
Target	0.40	0.25	1.00	2.00	0.25

速度はRR装置のくさび角度を用いて横圧縮速度から幾何学的に決定した。

2.2.2 変形抵抗値

変形解析で鍛造荷重を高精度に予測するためには、正確な変形抵抗値が必要となる。前述したように、実機鍛造最終工程では横圧縮速度が非常に遅い。そのため、特に低ひずみ速度域に重点をおいて測定する必要がある。本研究では、一体型クランク軸に用いる低合金鋼について、温度条件を変えた圧縮試験を行い、平均変形抵抗を測定した。測定した鋼種の成分を表2に示す。

図10に平均相当ひずみ $\epsilon_{eq} = 1.0$ での各温度における応力とひずみ速度の関係を示す。

変形抵抗値の数式的表現は種々あるが、ひずみ、ひずみ速度および温度に対して、簡便のため、次式がしばしば用いられている。

$$= F \cdot \epsilon_{eq}^n \cdot \dot{\epsilon}_{eq}^m \cdot \exp\left(\frac{B}{T}\right) \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 F は変形抵抗値、 ϵ_{eq} は相当ひずみ、 $\dot{\epsilon}_{eq}$ は相当ひずみ速度、 T は絶対温度、 F, n, m, B は材料定数を表す⁴⁾。

平均相当ひずみ $\epsilon_{eq} = 1.0$ における各温度でのひずみ速度に対し、式(1)を変形した以下に示す近似式(2)を

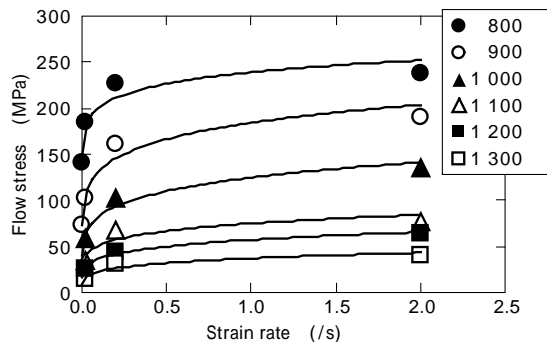


図10 各温度での応力とひずみ速度の関係 ($\epsilon_{eq} = 1.0$)

Fig.10 Relationship between flow stress and strain rate at various temperatures ($\epsilon_{eq} = 1.0$)

定義した。これを内外挿し，変形解析に使用する変形抵抗値とした。

$$= f(\dot{\epsilon}_{eq}, T) = k \cdot \dot{\epsilon}_{eq}^m \dots\dots\dots(2)$$

ここで， σ : 変形抵抗値

$\dot{\epsilon}_{eq}$: 平均ひずみ速度

k : 係数 (温度の関数)

m : ひずみ速度依存性指数

係数 k は，式 (1) および式 (2) から温度の関数であるため，ここでは，測定温度ごとに係数 k を算出した。表3に，平均相当ひずみ $\epsilon_{eq} = 1.0$ における，式 (2) より得られた各温度での係数 k とひずみ速度依存性指数 m を示す。

2.2.3 素材温度分布

写真1のように，RR 鍛造工程では鍛造する1気筒分のRR 素材を大気雰囲気での加熱炉で数時間加熱した後，RR 鍛造プレスに搬入し，鍛造を開始する。加熱終了から鍛造開始まで空冷されるため，RR 素材は温度低下する。また同時に素材温度分布が発生することにより，材料流動の起こりやすさが変化し，パリの出方や金型への充満状態が異なる。その結果，鍛造形状，鍛造荷重にバラツキが生じると考えられる。そこで，鍛造開始時の素材温度分布を定量的に把握するため，温度解析ソフトによる予測を行った。

図11に本研究で使用した代表的な加熱炉中央部での炉内雰囲気温度履歴を示す。横軸は経過時間を示し，1気筒目と2気筒目の加熱時の測定結果である。温度測定点は，炉内バーナ2箇所の中間点で炉高の中心である。RR 素材の中心からは， $D_h = 0\text{mm} \sim 200\text{mm}$ 程度上方にずれた位置にあるが，過去の実測結果から代表点として使用できることを確認している。

1気筒目の加熱は190分で完了し，RR 鍛造後，再入炉されるまでに30分かかる。この間は空冷条件とした。2気筒目は1気筒目の加熱を受けているため100分で加熱される。3気筒目以降は2気筒目の温度履歴が繰返される。本研究では，1気筒目および2気筒目の素材温度分布に差がないため，定常状態となる2気筒目の加熱条件を対象に温度解析を行った。

図11に示す加熱履歴に基づいて，RR 素材の温度解析を行った。図12に，温度解析から得られたブロック長手中央部における中心部および表層部の温度履歴を示す。図13に，温度解析より得られた加熱終了直後，5分後，10分後の素材半径方向の温度分布を示す。同図に実

表3 各温度における係数 k およびひずみ速度依存性指数 m ($\epsilon_{eq} = 1.0$)

Table 3 Coefficient k and strain-rate sensitivity exponent m at various temperatures ($\epsilon_{eq} = 1.0$)

Temperature ()	k	m
800	239.1	0.077
900	184.2	0.147
1000	124.7	0.180
1100	74.9	0.169
1200	57.2	0.196
1300	37.1	0.217

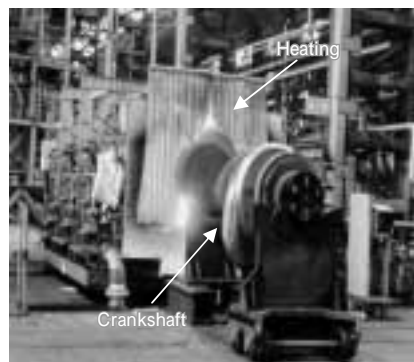


写真1 加熱の様子

Photo 1 Appearance of heating

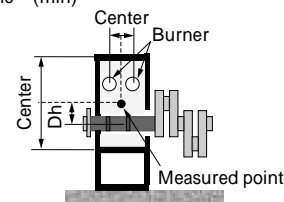
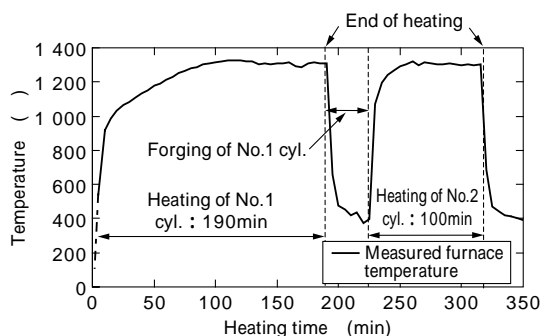


図11 加熱炉雰囲気温度履歴

Fig.11 History of temperature during actual heating

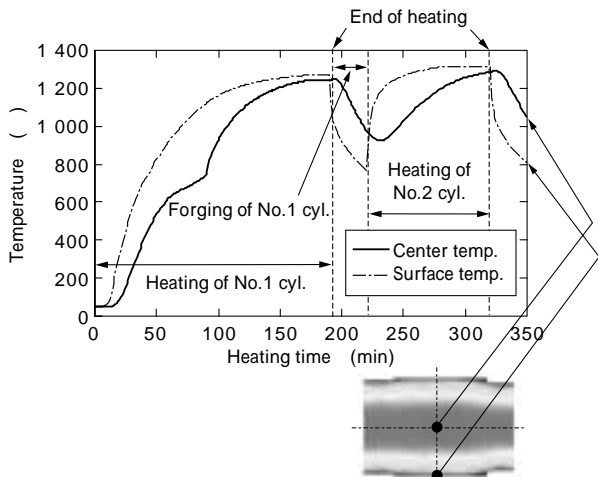


図12 表層部と中心部の温度解析結果

Fig.12 Results of temperature analysis at surface and center of bar

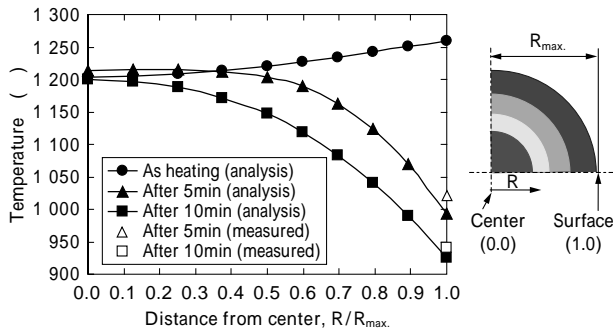


図13 素材半径方向の温度分布の比較

Fig.13 Relationship between representative temperature distribution of radius direction by using analysis and actual measurement

表4 素材半径方向各位置の温度

Table 4 Temperature distribution of radius direction calculated by temperature analysis

Position	Center $\frac{0}{4}R$	$\frac{1}{4}R$	$\frac{2}{4}R$	$\frac{3}{4}R$	Surface $\frac{4}{4}R$
Case 1	1 280	1 280	1 280	1 175	1 070

際の素材表層部の温度を放射温度計にて測定した結果を示すが、精度よく一致していることがわかる。以上から、素材温度分布が予測可能であることがわかった。なお、加熱終了からRR鍛造開始までの時間を実機にて実測した結果、5分であったため、加熱終了後5分間空冷した温度解析結果を変形解析に用いた。表4に変形解析に使用した温度条件を示す。なお、金型による抜熱に関しては、別途変形解析を行って金型充填状態を比較した結果、ほとんど差がないので簡略化のため考慮しないこととした。

2.2.4 素材体積変化

RR素材が加熱されることにより、厚さ2~5mm程度の酸化スケールが生成し、体積が減少する。そこで、酸化スケールの密度を実測し、減少した体積を算出した結果、加熱前初期体積の3%であることがわかった。

一方、通常の変形解析では、変形前後で解析モデルの体積が保存されることを前提としている。しかし、本研究で用いた解析手法の場合、リメッシュにより解析モデルの体積が減少する。解析での体積減少率を調査した結果、解析モデルの場合で初期体積の1.0%、解析モデルでは1.6%であることがわかった。

変形解析の初期形状として、体積減少率を最終的に実測値と一致させるために、ブロック部の体積を解析モデルでは2.0%、解析モデルでは1.4%減少させた。なお、体積減少は、ブロック部の径を小さくすることで表現した。

2.2.5 摩擦条件

鍛造形状や鍛造荷重などにかかわる重要な因子のひとつにRR素材と金型との摩擦が挙げられる。実際の鍛造作業では、材料流動を制御するため、金型に潤滑油を故意に塗布しない部位がある。本解析では、クーロン則を用い、潤滑油を使用する部位については摩擦係数 $\mu = 0.1$ とし、使用しない部位は摩擦係数 $\mu = 0.3$ を用いた。

3. 変形解析結果

図14に解析モデルでの解析結果および実機形状を示す。表5に図14で得られた解析結果と実機形状の寸法を示す。同表から3%以内で寸法が一致していることがわかる。

図15に解析モデルの変形解析結果と実機形状の比較を示す。また、図16にバリ高さについての解析結果と実機測定結果の比較を示す。これらの図より、バリ高さが精度よく一致しており、金型の拘束状態が異なる場合でも形状予測が可能であることを確認した。

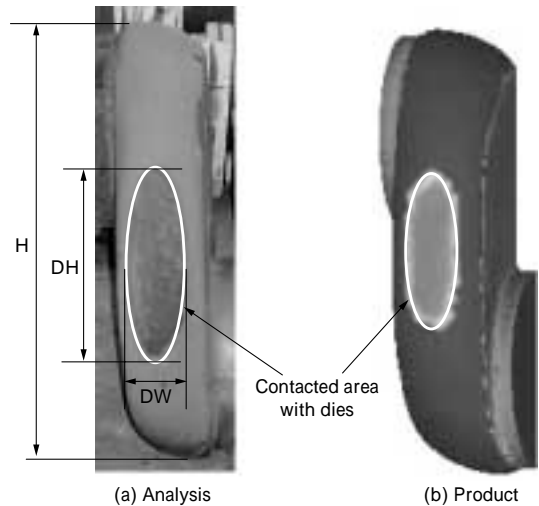


図14 解析と実機における金型接触域の比較

Fig.14 Contacted area with dies compared between product and analytical result

表5 解析結果と実機形状の鍛造品高さおよび金型接触長さの比較
Table 5 Relationship between analytical result and product about height of arm and contacted length with dies

	Target	Product	Analytical result
H	985	995	990
DH	-	388	378
DW	-	128	132

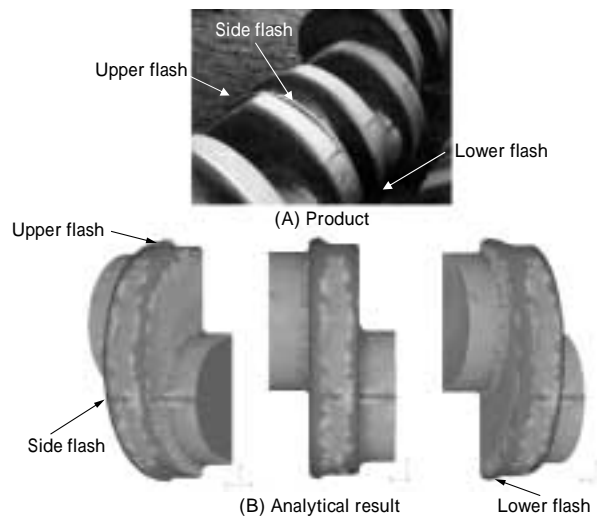


図15 鍛造形状および各位置におけるバリ形状の実機と解析結果の比較

Fig.15 Forged shape and each flash at position compared between product and analytical result

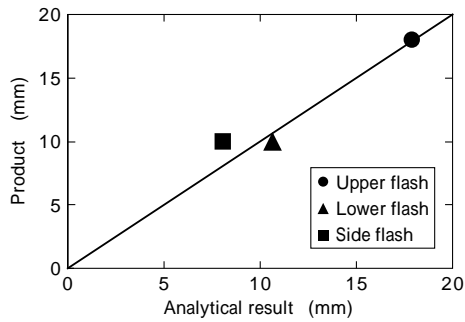


図16 バリ高さにおける実機と解析結果の比較

Fig.16 Height of flash compared between product and analytical result

4. 鍛造荷重予測式

RR 鍛造の工程設計にあたり，RR 素材の温度と鍛造荷重の関係を定量的に把握することは大変重要である。例えば，鍛造可能な限界鍛造開始温度を予測できれば加熱時間の短縮による生産効率の飛躍的な向上が期待できる。しかし，実機で鍛造荷重を測定することは困難で，従来は経験的に工程設計を行っていた。そこで，解析モデルを用いて素材温度が鍛造荷重に及ぼす影響を調査することとした。

金型への充填状態が異なると鍛造荷重が異なる。また，金型への充填状態の支配因子のひとつに材料流動が挙げられるが，これは素材表面近傍の温度分布の影響を大きく受けると考えられる。そのため，素材表面近傍の温度分布について平均温度を算出し，この平均温度と鍛造荷重との関係を調査した。表6に変形解析に用いた素材温度分布を示す。なお，平均温度の算出方法は，RR 素材中央部の縦断面内で定めた位置から表面（4/4R）までの領域を細分し，細分した面積とその部位の温度を積算，総和した結果を細分した面積の総和で割った値を使用した。例えば，図17のように素材半径に対し2/4の位置（2/4R）から表面（4/4R）までの領域に関して算出した。なお，このような場合，平均温度の表記を2/4R平均温度とする。

種々の平均温度と鍛造荷重との関係を調査した結果，鍛造荷重は3/4R平均温度との相関が高いことがわかった。図18に，縦軸を鍛造荷重，横軸を3/4R平均温度とした場合の結果を示す。3/4R平均温度の低下に伴って鍛造荷重は増加する傾向にある。そこで，鍛造荷重を3/4R平均温度の関数として定式化することを試みた。

一般に荷重は式(3)のように表現可能である。

$$P = Q \cdot A \dots\dots\dots(3)$$

ここで， P ：最終鍛造荷重

Q ：拘束係数

：変形抵抗値

A ：接触面積

すなわち，鍛造荷重は被加工材料の変形抵抗値と工具形状および摩擦による素材流動の拘束の大きさ（拘束係数），寸法によって定まる⁵⁾。

RR 鍛造は大変形で型式が異なっても平均ひずみに大きな差はなく，平均相当ひずみ $\epsilon_{eq} = 1.0$ であることが解析結果から得られている。この値と，式(1)の変形抵抗

表6 変形解析に使用した温度条件

Table 6 Temperature conditions of deformation analysis

Position	()					
	Center 0/4-R	1/4-R	2/4-R	3/4-R	Surface 4/4-R	3/4-R Avg.
1 ~ 5	1 270, 1 200, 1 100, 1 000, 900					
6	1 280	1 280	1 170	985	800	870
7	1 270	1 270	1 270	1 135	800	925
8	1 110	1 110	1 090	995	900	935
9	1 170	1 170	1 130	1 050	925	970
10	1 185	1 185	1 185	1 120	980	1 035

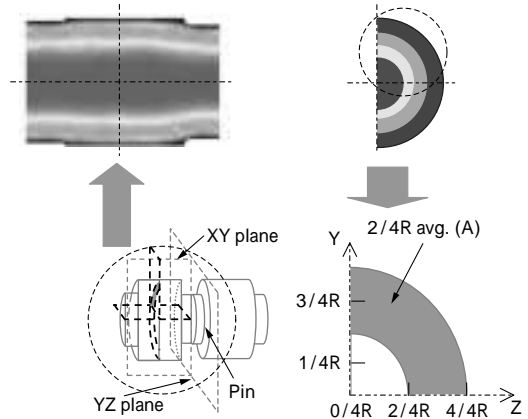


図17 2/4R 平均温度の概略図 (YZ 平面)

Fig.17 Schematic illustration of 2/4R avg. temperature (YZ plane)

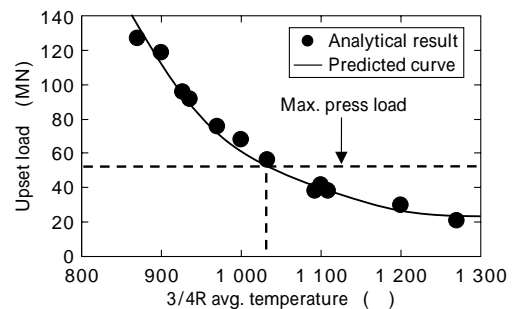


図18 横圧縮荷重と3/4R平均温度との関係

Fig.18 Relationship between upset load and 3/4R avg. temperature

値と温度の関係式を利用して，変形抵抗値を式(4)で表記した。

$$= \mathcal{D}(\dot{\epsilon}_{eq}, T) = \mathcal{D}(\dot{\epsilon}_{eq}) \cdot \exp\left(\frac{E}{T+273}\right) \dots\dots\dots(4)$$

ここで， $\mathcal{D}(\dot{\epsilon}_{eq})$ ：平均相当ひずみ $\epsilon_{eq} = 1.0$ におけるひずみ速度の関数

T ：温度 ()

E ：材料定数

なお，本研究では，温度 T は3/4R平均温度を示している。また，変形抵抗値の実測結果から $E = 8094.2$ を得た。

図8に示すように実機の最終での横圧縮速度は1mm/sec程度とほぼ一定で，平均ひずみ速度もほぼ一定であった。その結果，ひずみ速度に関する項 $\mathcal{D}(\dot{\epsilon}_{eq})$ は， $\epsilon_{eq} = 1.0$ の場合の変形抵抗値測定結果である図10から $\mathcal{D}(\dot{\epsilon}_{eq}) = 0.1$ が得られる。以上から，式(2)，(3)を以下のように書換えられる。

$$P = 0.1 \cdot Q \cdot \exp\left(\frac{E}{T+273}\right) A \dots\dots\dots(5)$$

ここで，本研究では，鍛造形状を変更していないため，

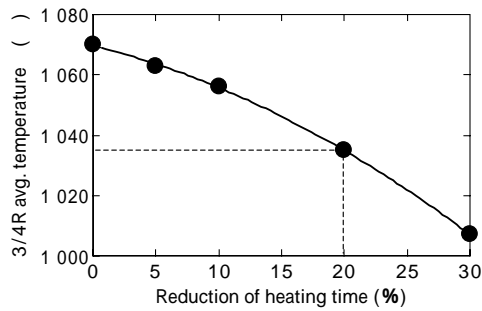


図19 加熱時間短縮率と3/4R平均温度との関係

Fig.19 Relationship between reduction of heating time and 3/4R avg. temperature

Q および A は一定であり、式(6)のように定義した。

$$FK = 0.1 \cdot Q \cdot A \quad \dots\dots\dots(6)$$

ここで、 FK ：鍛造形状係数

以上から、3/4R平均温度による鍛造荷重の予測式として式(7)を定義できる。

$$P = FK \cdot \exp\left(\frac{E}{T+273}\right) \quad \dots\dots\dots(7)$$

図18から式(7)の係数 FK を同定した結果、 $FK = 112.44$ であった。なお、鍛造形状係数 FK は鍛造形状や素材形状によって種々変化する。

ここで、鍛造装置力量は5000トンに別途3300トンの横圧縮専用シリンダが付帯している。5000トンのプレス力から得られる横圧縮力は、金型の押さえ力、アンビルからの反力、くさび機構における摩擦力、固定金型の移動に伴う摩擦力などで減衰するため、1900トン程度であると考えられる。従って、横圧縮力はそれに3300トンを足した5200トン程度と推定される。

この鍛造プレスの最大横圧縮力と鍛造荷重予測式とを活用することで、鍛造限界となる3/4R平均温度は1035

であることが予測された。次に、この3/4R平均温度が1035となる加熱条件を温度解析により算出した。図19に、解析モデルにおける実機での平均加熱時間からの時間短縮率とRR素材の3/4R平均温度との関係を示す。この結果から、3/4R平均温度が1035となる条件は、実機での平均加熱時間から20%短縮した場合であることがわかった。そこで、この条件について実機試作および変形解析を行い、鍛造形状およびバリ高さについての比較を行った。図20に解析結果および実験結果を、図21にバリ高さの比較を示す。この結果より、形状がよく一致していることがわかる。なお、実機鍛造形状は詳細な検査を行い、欠肉が発生していないことも確認した。

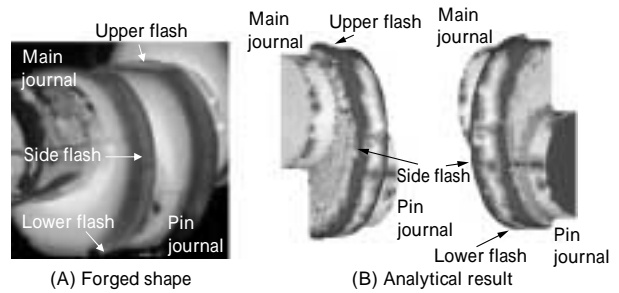


図20 鍛造形状の実機と解析結果の比較

Fig.20 Forged shape compared between product and analytical result

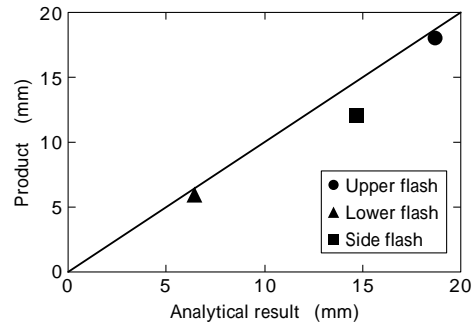


図21 バリ高さにおける実機と解析結果の比較

Fig.21 Height of flash compared between product and analytical result

以上より、温度解析を用いて加熱条件から素材温度分布を予測した上で3次元変形解析を行うと、鍛造形状および荷重の予測が可能であることがわかった。また、RR素材の3/4R平均温度を用いた鍛造荷重に関する予測式を構築した。

むすび= 一体型クランク軸のRR鍛造工程について数値シミュレーションを適用し、以下の結果を得た。

- 1) 素材体積や温度分布などの解析条件を適正化し変形解析を行った結果、鍛造形状の予測が可能である。
- 2) 温度解析により求めたRR素材の3/4R平均温度から、最終鍛造荷重の予測が可能であることを明らかにし、定式化した。
- 3) 鍛造荷重予測式を活用して、プレス最大横圧縮力から鍛造限界温度の見極めが可能となり、適正加熱条件が得られた。

参考文献

- 1) 荒木重臣ほか：塑性加工春季講演会(1990) p.495.
- 2) 商健ほか：第52回塑性加工連合講演会, p.73.
- 3) 荒木重臣ほか：第41回塑性加工連合講演会, p.435.
- 4) 鈴木 弘：塑性加工(1996) p.59.
- 5) 日本塑性加工学会編：鍛造(1995) p.260.